

**ANÁLISIS DE MODELOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA
DIFERENTES ELECTRODOS Y CONDICIONES DE SUELOS.**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ANÁLISIS DE MODELOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA
DIFERENTES ELECTRODOS Y CONDICIONES DE SUELOS.**

**AUTOR:
VIVIANA GUILLERMINA BASANTE GUALPA**

**DIRECTOR:
ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ**

Quito, Noviembre 2019

Viviana Guillermina Basante Gualpa

**ANÁLISIS DE MODELOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA
PARA DIFERENTES ELECTRODOS Y CONDICIONES DE SUELOS**

Universidad Politécnica Salesiana-Quito 2019

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Viviana Guillermina Basante Gualpa (Y'1993-M'10). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Humanístico Experimental "Quito". Egresada de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el análisis de modelos de sistemas de puesta a tierra para diferentes electrodos y condiciones de suelos mediante el estándar IEEE 80.

vbasante@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Rogelio Alfredo Orizondo Martínez (Y'1972 -M'1). Nació en Caracas, Venezuela. Recibió su título en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Simón Bolívar en 1999 y el MSc. en la Universidad Simón Bolívar en 2006. Actualmente es docente en la Universidad Politécnica Salesiana. Sus áreas de investigación incluyen electrónica de potencia, especialmente FACTS, sistemas de puesta a tierra y protección catódica.

rorizondo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2019 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Rogelio Alfredo Orizondo Martínez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*ANÁLISIS DE MODELOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA DIFERENTES ELECTRODOS Y CONDICIONES DE SUELOS*” realizado por Viviana Guillermina Basante Gualpa, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Noviembre del 2019



.....

Rogelio Alfredo Orizondo Martínez

C.C.: 1757424195

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Viviana Guillermina Basante Gualpa, con documento de identificación N° 1723363725, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “*ANÁLISIS DE MODELOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA DIFERENTES ELECTRODOS Y CONDICIONES DE SUELOS*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Eléctrica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito D.M., Noviembre del 2019



.....

Nombre: Basante Gualpa Viviana Guillermina

Cédula: 1723363725

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	2
2. Marco Teórico	3
2.1 Sistema de Puesta a Tierra	3
2.1.1 Partes de un sistema de puesta a tierra.	3
2.1.2 Tipos de sistemas de puesta a tierra.	3
2.1.2.1 Protección para sistemas eléctricos.....	4
2.1.2.2 Protección para equipos eléctricos.....	4
2.1.2.3 Protección para señales electrónicas.....	4
2.1.2.4 Protección para elementos electrónicos	4
2.1.2.5 Protección para eventos atmosféricos.....	4
2.1.2.6 Tierra de protección.	4
2.2 Factores que influyen en la resistividad del terreno.....	4
2.2.1 Temperatura.....	4
2.2.2 Humedad	4
2.2.3 Estratificación.....	5
2.2.4 Compactación del suelo.....	5
2.2.5 Salinidad	5
2.3 Criterios del diseño de la puesta a tierra.	5
2.3.1 Selección del área del conductor	6
2.3.2 Tensiones de toque y paso.....	8
2.3.3 Longitud del conductor requerido	9
2.3.4 Elevación del potencial de tierra GPR.....	10
2.4 Métodos para la medición de la Resistividad.....	10
2.4.1 Método de Wenner	10
2.4.2 Método de Schlumberger-Palmer.....	11
2.5 Tipos de Suelo.....	11
2.5.1 Suelo uniforme	11
2.5.2 Suelo de dos capas.....	12
2.5.3 Suelo multicapas.....	12
2.6 Ecuaciones de Schwarz para suelos homogéneos y de dos capas.....	12
2.7 Métodos para bajar la resistividad del suelo.	13

2.7.1 Bentonita	13
2.7.2 Sales y compuestos Minerales.....	14
2.7.3 Electrodoes Especiales	14
2.7.4 Revestimiento de concreto	14
2.8 Modelo IEEE Std 80-2013	15
3. Análisis de Resultados	17
3.1 Cálculo para mallas	17
4. Conclusiones	18
5. Trabajos Futuros	19
6. Referencias.....	19
6.1 Estado del Arte	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Corriente de fibrilación vs peso del cuerpo, en 3 segundos de duración de una falla.....	8
Figura 2. Circulación de la corriente de paso.....	8
Figura 3. Circulación de la corriente de toque	9
Figura 4. Método gráfico Wenner	11
Figura 5. Método gráfico Schlumberger	11
Figura 6. Curvas de Sunde [5].....	12
Figura 7. Bentonita.....	14
Figura 8. Ejemplo de un terreno aplicando sales minerales.....	14
Figura 9. Electrodo huecos con orificios de salida.....	14
Figura 10. Cemento especial conductor	14
Figura 11. Pantalla Principal del programa.....	17
Figura 12. Ingreso de datos iniciales.....	17
Figura 13. Ingreso de datos medidos y tipo de suelo	17
Figura 14. Método de Sunde	17
Figura 15. Selección del conductor, parámetros de voltaje y diseño.	18
Figura 16. Mensaje de cumplimiento del estándar IEEE 80.....	18
Figura 17. Mensaje de cumplimiento del estándar IEEE 80.....	18

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de suelos y sus resistividades.....	6
Tabla 2. Constantes para determinar el Área del conductor	7
Tabla 3. Constantes para determinar el Área del conductor	7
Tabla 4. Dimensiones de los conductores	8
Tabla 5. Variables utilizadas en el algoritmo.....	15
Tabla 6. Algoritmo utilizado en la modelación del sistema de puesta a tierra.....	16
Tabla 7. Matriz del Estado del arte	23

ANÁLISIS DE MODELOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA DIFERENTES ELECTRODOS Y CONDICIONES DE SUELOS

Resumen

En la actualidad, los sistemas de puestas a tierra son de suma importancia para salvaguardar la vida de las personas, así como para proteger los equipos eléctricos y electrónicos. La función de un sistema de puesta a tierra es desviar la corriente producida por fallas eléctricas o eventos meteorológicos como los rayos hacia la tierra. Las características del terreno donde se va a construir la puesta a tierra son determinantes para el diseño, mediante métodos de medición de la resistividad como Wenner. El presente trabajo desarrolla un programa basado en el estándar IEEE Std 80-2013 para el diseño de puestas a tierra tomando en consideración el tipo de suelo en el que se trabaja, si es homogéneo o si se tiene dos estratos de suelos. Además, permite elegir el tipo de electrodo con el que se va a trabajar. El programa se realizó en el software Matlab en la extensión GUI, permitiendo cumplir los objetivos y alcances propuestos en el presente trabajo analizando sistemas de puestas a tierra en distintos escenarios y bajo distintas condiciones.

Palabras Clave: IEEE Std 80-2013, Resistencia, Resistividad, Sistema de puesta a tierra, Wenner.

Abstract

At present, grounding systems are of the utmost importance to safeguard people's lives, as well as to protect electrical and electronic equipment. The function of a grounding system is to divert the current produced by electrical failures or weather events such as lightning. The characteristics of the soil where the grounding is to be built are decisive for the design. Programmed resistivity measurement method is Wenner. The present work develops a program based on the IEEE Std 80-2013 standard for the design of grounding system taking into consideration the type of soil on which one is working, if it is homogeneous or if there are two layers of soil. In addition, it allows you to choose the type of electrode you are going to work with. The program was carried out in the Matlab software using the extension GUI, it will fulfill the objectives and scope proposed in the present work, analyzing grounding systems in different scenarios and under different conditions.

Keywords: Grounding System, IEEE Std 80-2013, Resistance, Resistivity, Wenner.

1. Introducción

Muchas industrias dependen de la energía eléctrica para poner en funcionamiento muchos equipos. Por este motivo los sistemas de puesta a tierra han cobrado importancia en los últimos años al realizar diseños para sistemas eléctricos, pues proporcionan seguridad para los equipos que posee la industria y sobre todo al personal que los manipula. Los sistemas de puesta a tierra deben ser confiables. Existe la puesta a tierra del sistema y del equipo [1][2]. La puesta a tierra del equipo se la puede definir como la conexión de las partes metálicas que no transportan corriente a tierra; como las carcasas de los motores eléctricos, evitando descargas directas hacia las personas al existir sobre corrientes por fallas o desperfectos existentes en las fábricas [3][4].

La conexión a tierra del sistema consiste en conectar toda la red a una malla de puesta a tierra por medio de un conductor, tomado en cuenta que la malla se encuentra conformada por electrodos y la propia tierra, al existir fallas en la fábrica la sobre corriente que se produce en el sistema toma el camino a tierra sin dañar los equipos. Para ello deben existir varias condiciones: la principal es proporcionar una vía que tenga una impedancia baja para disipar esta sobre corriente [1][5][6].

Los sistemas de puesta a tierra tienen características fundamentales que se debe cumplir al ser diseñadas, deben tener la capacidad de conducir los cortocircuitos y las corrientes de los rayos [7][8]. Al tener protecciones sobre rayos, las industrias protegen a los equipos de fuego, descargas, sobrecalentamientos que se puede dar por el impacto directo de los rayos [9], con esto se logra cuidar al personal [5].

A continuación, se detalla los factores que se debe considerar al momento de diseñar un sistema de puesta a tierra[5][10]:

- La resistencia que debe tener el electrodo y la tierra. El electrodo debe tener la libertad de generar contacto con la tierra sin que agentes como grasas, pinturas o cualquier tipo de aislantes lo impida, ya que esto permite que la corriente se descargue de la manera más rápida por la tierra. Una manera incorrecta de colocar los electrodos es colocándolos cerca de los muros o postes, debido a que estos elementos se comportan como aisladores y no permiten una descarga instantánea.
- La resistividad propia del terreno. La tierra posee una resistividad propia y de las características que esta tenga va a depender el valor final de la resistencia del sistema. Es de suma importancia verificar en qué tipo de suelos se va a trabajar siendo este un factor primordial en el diseño.

Las principales ventajas de aterrizar los sistemas eléctricos son:

- Proporcionar seguridad al personal que trabaja en las fábricas, al no permitir que queden expuestos a sobre corrientes por fallas [11].
- Ofrecer una impedancia sumamente baja permitiendo así que las protecciones operen de una manera más rápida en condiciones de falla.
- Lograr mantener el voltaje del sistema dentro de los límites tolerables al existir fallas.
- Lograr mantener el voltaje del sistema dentro de los límites tolerables al existir fallas.

Se considera que la tierra posee un potencial de cero voltios. Por este motivo cualquier tipo de conductor que está conectado a esta recibe el nombre de tierra o 'ground' por el término en inglés. Comúnmente se la representa con las siglas GND o G.

En el presente trabajo se documenta la realización de una aplicación gráfica (GUI) en el software Matlab para diseñar un sistema

de puesta a tierra, tomando en cuenta el Standard 80-2013 de IEEE y agrupando varias técnicas de diseño para la implementación de los sistemas de puestas a tierra.

El algoritmo propuesto permite modelar los sistemas más simples hasta sistemas robustos de puesta a tierra para ello se utiliza diversas variables de decisión las cuales se detallan más adelante, por este motivo el algoritmo es capaz de verificar que el diseño converja y arroje una solución adecuada al verificar los voltajes de toque y de paso; al no suceder esto el programa da aviso y permite modificar las variables iniciales para dar solución al problema.

El modelo permite diseñar sistemas de una varilla, dos varillas, mallas, todas estas con diferentes condiciones de superficies como suelos homogéneos y no homogéneos.

2. Marco Teórico

2.1 Sistema de Puesta a Tierra

El sistema de puesta a tierra comprende todo tipo de conexión entre un equipo o elemento metálico directo a tierra, tomando en cuenta que en esta conexión no existe ninguna clase de protecciones como fusibles o breakers. Esta conexión se lo realiza por medio de electrodos o grupos de electrodos, los que son enterrados en el suelo, logrando eliminar voltajes provenientes de la superficie [12], edificios aledaños o conexiones cercanas, además de, permitir las corrientes de falla o de descargas atmosféricas[13][14][15].

Cabe recalcar que existe el término normalizado para definir la resistencia al paso de corriente eléctrica hacia el suelo a través de una puesta a tierra ‘Resistencia de Puesta a Tierra’ [16][17][18]. Una puesta a tierra está conformada por una impedancia es decir posee parte resistiva inductiva. Cada una de estas características influye directamente en la capacidad del sistema para conducir la corriente hacia la tierra [19][20]. De esta manera no se debe tomar en cuenta

solo la resistencia del sistema, sino en una impedancia de puesta a tierra [14][21][22].

2.1.1 Partes de un sistema de puesta a tierra.

El sistema de puesta a tierra está conformado principalmente por tres elementos los cuales se detallan a continuación:

- **Conductores:** El principal conductor que se utiliza en los sistemas de puestas a tierra es el conductor de cobre, al proporcionar mayor conductividad eléctrica y térmica, además de ser relativamente resistente a la corrosión.
- **Electrodos:** Comprende varillas, conductores, placas o la unión entre estos materiales. Al tener suelos húmedos se tiene una menor resistividad. Por este motivo se pueden utilizar electrodos verticales mejorando la resistividad del sistema. Los electrodos pueden ser varillas enteras de cobre o fierro galvanizado, también se puede utilizar tubos [23].
- **Conectores y accesorios:** Fundamentalmente constan de los elementos que nos sirven para la unión de los electrodos, conductores y el sistema eléctrico al cual se esté protegiendo.

Los principales conectores son los atornillados, a presión y los soldados. Hay que tener en cuenta que, cualquier tipo de conector debe tener la capacidad de soportar las corrientes de falla o atmosféricas de forma prolongada. Están fabricados de cobre de diferentes aleaciones. Al no ser un material magnético, permiten que las descargas atmosféricas de alta frecuencia tengan una vía de conducción segura.

2.1.2 Tipos de sistemas de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra se pueden clasificar de acuerdo con su aplicación en[3][4]:

2.1.2.1 Protección para sistemas eléctricos

En los sistemas eléctricos se coloca la puesta a tierra para limitar la corriente de falla o por corrientes que pueden llegar a los equipos por descargas atmosféricas. Además de limitar el voltaje máximo referente a tierra.

Los elementos que se deben conectar al sistema de puesta tierra en sistemas eléctricos son: neutros de los transformadores, motores, circuitos eléctricos de baja tensión.

2.1.2.2 Protección para equipos eléctricos

Al aterrizar los equipos se logra proteger al personal, eliminando el voltaje de toque y de paso. Para mayor seguridad y funcionalidad se deben conectar a tierra todos los elementos. Cualquier sistema de puesta a tierra no debe superar los 10 ohmios de resistencia. Es aconsejable colocar una toma de tierra en los tableros de distribución.

2.1.2.3 Protección para señales electrónicas

Los sistemas de puesta a tierra ayudan a eliminar señales de datos con frecuencias no deseadas. Para ello se utilizan cables blindados. Se utiliza distintos tipos de blindajes tanto metálicos y estos van aterrizados.

2.1.2.4 Protección para elementos electrónicos

Los equipos electrónicos poseen elementos semiconductores los cuales son sensibles a las variaciones de voltaje. Por ello es necesario colocar todos los equipos de control y electrónicos a tierra mediante una barra de cobre exclusiva para los elementos y equipos electrónicos. Para este caso en especial la resistencia del suelo no debe superar los 2 ohmios, si lo hace se debe reducir la resistividad del terreno.

2.1.2.5 Protección para eventos atmosféricos.

Los sistemas de puestas a tierra para los eventos atmosféricos protegen principalmente de los rayos que pueden

generarse por tormentas eléctricas. Al momento que estas caen directamente sobre edificios o viviendas, la corriente que posee los rayos puede circular a través de los circuitos o elementos que estén dentro de los mismos. Por este motivo se diseña una malla de puesta a tierra. Se pueden construir con varillas y conductor trenzado de varios hilos. La resistencia no debe superar los 10 ohmios [24][25].

2.1.2.6 Tierra de protección.

Se denomina tierra de protección aquella diseñada para la seguridad del personal, en esta se conectan las carcassas o cubiertas metálicas de los equipos. Se debe aterrizar a todos los elementos metálicos o que contengan partes metálicas como [26][27]:

- Armarios metálicos
- Conductores y tuberías metálicas
- Las carcassas de motores, generadores, transformadores y demás máquinas que posean carcassas metálicas.
- Puertas, cercas y vallas metálicas.
- Columnas y soportes metálicos.

2.2 Factores que influyen en la resistividad del terreno.

Existen diversos factores que afectan la resistividad del terreno como: la temperatura, humedad, estratigrafía, compactación, naturaleza del terreno, salinidad y la variación de la estación climática en la que se encuentre el terreno, a continuación, se detallan cada uno de estos factores [28][29].

2.2.1 Temperatura

La resistividad del terreno cambia con las temperaturas. Se puede concluir que a menor temperatura mayor resistividad, en caso de tener temperaturas altas la resistividad no va a variar.

2.2.2 Humedad

La humedad ayuda de manera significativa a la resistividad del terreno. A más humedad del terreno, la resistividad va a ser menor. Por

el contrario, si un terreno tiene poca humedad o es seco va a aumentar la resistividad.

2.2.3 Estratificación

La estratigrafía estudia los componentes de cada una de las capas de suelo con las que se compone el terreno, dependiendo de cuantas capas posea y las características específicas de cada una de ella van a variar la resistividad.

2.2.4 Compactación del suelo

La compactación del terreno influye en la resistividad del terreno al tener mayor compactación disminuye la resistividad. Si el terreno no está bien compactado y existe la presencia de espacios pequeños por el cual puede circular el aire la resistividad aumenta.

2.2.5 Salinidad

Los principales componentes conductores que posee el suelo son las sales minerales. Las que abundan y se encuentra en mayor cantidad son el cloruro de sodio y cloruro de potasio. Al mezclarse con el agua estas sales se convierten en un gran conductor, y ayuda a disminuir la resistividad.

2.3 Criterios del diseño de la puesta a tierra.

Existen criterios específicos para el diseño de la puesta a tierra que se utiliza en el estándar IEEE-Std 80-2013, a continuación, se detallan cada uno de ellos:

Uno de los principales parámetros es la corriente máxima de falla (I_G) que puede soportar la malla. Esta dada por la siguiente ecuación[3][4][30]:

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p \quad (1)$$

Donde:

$I_F \rightarrow$ Es la corriente simétrica de falla a tierra.

$D_f \rightarrow$ Factor de decremento por componentes DC

$S_f \rightarrow$ Es el factor de división de corriente

$C_p \rightarrow$ Incremento futuro de la corriente de falla

Otro parámetro es la corriente simétrica de la falla a tierra (I_F). Este parámetro contempla la falla línea – línea y la falla línea – tierra las ecuaciones que se muestran a continuación expresan como deben ser calculadas.

$$(I_G)_{L-L-T} = 3 \cdot I_0 = \frac{3EZ_2}{Z_1(Z_0 + Z_2) + Z_2Z_0} \quad (2)$$

$$(I_G)_{L-T} = 3 \cdot I_0 = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (3)$$

Donde:

$I_0 \rightarrow$ Es la corriente simétrica de la secuencia 0 de la falla.

$E \rightarrow$ Tensión fase- neutro

$Z_1 \rightarrow$ Impedancia de la secuencia positiva

$Z_2 \rightarrow$ Impedancia de la secuencia negativa

$Z_0 \rightarrow$ Impedancia de la secuencia cero

El factor de decremento ayuda en el diseño de la puesta tierra, debido a que se necesita calcular la corriente asimétrica de la falla. Para ello se debe multiplicar el factor de decremento por la corriente simétrica. La siguiente ecuación muestra cómo se calcula este factor:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f}} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}} \right) \quad (4)$$

Donde:

$t_f \rightarrow$ Tiempo de duración de la falla

$T_a \rightarrow$ Constante de tiempo de la componente DC

En la ecuación 5 se puede determinar la constante de tiempo de la componente en DC.

$$T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} \quad (5)$$

El factor de crecimiento (C_p) se puede asumir como uno, tomando en cuenta que no se va a prever ningún aumento en el sistema que se está protegiendo.

En cuanto a los factores de la duración de falla (t_f) y choque (t_s) en general se los toma con valores iguales y se da en los rangos entre 0.25 a 1 segundos.

La geometría de la malla presenta medidas para el diseño y puesta en marcha de la malla a tierra como: el espacio entre conductores o electrodos (D) deben estar en el rango de 3 metros (m) hasta 15 m. La profundidad (h) deben estar entre 0.5 m hasta un máximo de 1.5 m. El calibre de los cables va desde los 2/0 hasta los 500 MCM (o kcmil), el diámetro del conductor no afecta sensiblemente a la tensión de la malla.

La resistividad de la capa superficial (ρ_s) corresponde a la capa extra que aumenta la resistividad de la malla. Para ello se utiliza grava o piedra triturada. Se coloca por encima de la malla y tiene un espesor (h_s) que va desde 0.1 m hasta los 0.3 m. Al existir una falla, la corriente de falla que llega a la malla queda limitada entre el suelo y los pies de las personas que se encuentren sobre esta, además de ayudar en el cálculo del factor de disminución de la capa superficial (C_s), en la ecuación 6 se observa cómo se la calcula.

$$C_s = 1 - \frac{0.99 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (6)$$

Donde:

$C_s \rightarrow$ Factor de disminución de la capa superficial

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno (Ωm)

$\rho_s \rightarrow$ Resistividad de la capa superficial (Ωm)

$h_s \rightarrow$ Espesor de la capa superficial

El estándar también menciona el factor de reflexión entre las resistividades de materiales diferentes (K) y viene dada por:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (7)$$

La resistividad del terreno (ρ) se ve afectada por varios elementos como: la humedad, temperatura del ambiente, y los químicos que el terreno posea. Hay que tener en cuenta el tipo de suelo. La tabla 1 detalla varios tipos de suelos típicos y que resistividad posee.

Tabla 1. Tipos de suelos y sus resistividades

SUELOS	RESISTIVIDAD (Ωm)
Lama	5-100
Humus	10-150
Limo	20-100
Arcillas	80-330
Tierra de jardín	140-480
Caliza fisurada	500-1000
Caliza compacta	1000-5000
Granito	1500-10000
Arena común	3000-9000
Basalto	10000-20000

2.3.1 Selección del área del conductor

La sección transversal del conductor de una puesta a tierra depende principalmente de la corriente simétrica de la falla, además de la temperatura. La ecuación para encontrar el área se detalla a continuación [3][4]:

$$A_{MCM} = I_f \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (8)$$

Donde:

$I_f \rightarrow$	Corriente asimétrica, se utiliza la mayor registrada
$A_{MCM} \rightarrow$	Área del conductor en MCM
$T_m \rightarrow$	Temperatura de fusión en °C
$T_a \rightarrow$	Temperatura ambiente en °C
$T_c \rightarrow$	Duración de la corriente en segundos
$TCAP \rightarrow$	Capacidad térmica por unidad de volumen
$\alpha_r \rightarrow$	Coefficiente térmico de resistividad
$\rho_r \rightarrow$	Resistividad del conductor de tierra.
$\alpha_0 \rightarrow$	Coefficiente térmico de resistividad a 0 °C
$K_f \rightarrow$	Constante del material dado a $T_a = 40$ °C
$K_0 \rightarrow$	$1/\alpha_0$

Existe la fórmula simplificada la cual da como resultados una buena aproximación para encontrar el área del conductor, y se puede calcular de la siguiente manera:

$$A_{MCM} = I_f * K_f * \sqrt{T_c} \quad (9)$$

En las tablas 2 y 3 se pueden observar las constantes para poder calcular el área del conductor.

Existen varias condiciones que debe cumplirse al seleccionar el conductor: debe tener la capacidad de soportar la corrosión, debe tener una alta conductancia, es decir debe tener una facilidad de paso de la corriente, evitando así las caídas de tensión.

Tabla 2. Constantes para determinar el Área del conductor

Descripción	α_r	K_0	T_m
Cobre, recocido	0.00393	234	1083

Cobre comercial	0.00381	242	1084
Cobre estirado	0.00378	245	1084
Cable de acero revestido de cobre	0.00378	245	1084
Varilla de acero revestida de cobre	0.00378	245	1084
Aluminio de grado EC	0.00403	228	657
Aluminio aleación 5005	0.00353	263	652
Aluminio aleación 6201	0.00347	268	654
Cable de acero revestido de aluminio	0.0036	258	657
Acero 1020	0.00316	605	1510
Varilla de acero revestida de acero inoxidable	0.0016	605	1400
Varilla de acero revestida de zinc	0.0032	293	416
Acero inoxidable	0.0013	749	1400

Tabla 3. Constantes para determinar el Área del conductor

Descripción	ρ_r	$TCAP$	K_f
Cobre, recocido	1.72	3.42	7
Cobre comercial	1.78	3.42	7.06
Cobre estirado	4.4	3.85	10.45
Cable de acero revestido de cobre	5.86	3.85	12.06
Varilla de acero revestida de cobre	8.62	3.85	14.64
Aluminio de grado EC	2.86	2.56	12.12
Aluminio aleación 5005	3.22	2.6	12.41
Aluminio aleación 6201	3.28	2.6	14.47
Cable de acero revestido de aluminio	8.48	3.58	17.2
Acero 1020	15.9	3.28	15.95
Varilla de acero revestida de acero inoxidable	17.5	4.44	14.62
Varilla de acero revestida de zinc	20.1	3.93	28.93
Acero inoxidable	72	4.03	30.5

Los conductores para la implementación de la puesta a tierra deben ser de cobre y al menos 2/0 AWG de 7 hilos, esto para que

soporte la corrosión. En la tabla 4 se describen las dimensiones de los conductores más utilizados para el sistema de puesta a tierra.

Tabla 4. Dimensiones de los conductores

Calibre del Conductor		Área	Diámetro
MCM	AWG		
350	-	177.35	0.015
300	-	152.01	0.139
250	-	126.68	0.127
211.6	4/0	107.22	0.117
167.8	3/0	85.03	0.104
133.1	2/0	67.44	0.093

2.3.2 Tensiones de toque y paso

La duración de la falla, el tiempo que esta sea despejada y el sistema desenergizado va a afectar de manera significativa al calcular el voltaje de paso y toque. Estos criterios se analizan para salvaguardar a las personas durante una posible falla. Para personas de 50 y 70 kg de peso corporal los voltajes máximos que pueden soportar se calculan a continuación[3][4][31]:

Primero se debe calcular la corriente de paso.

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

Donde:

$I_B \rightarrow$ Corriente de paso

$K \rightarrow$ Constante para valores efectivos de I_B

$t_s \rightarrow$ Duración de la falla

El valor de K se lo obtiene de la figura 1.

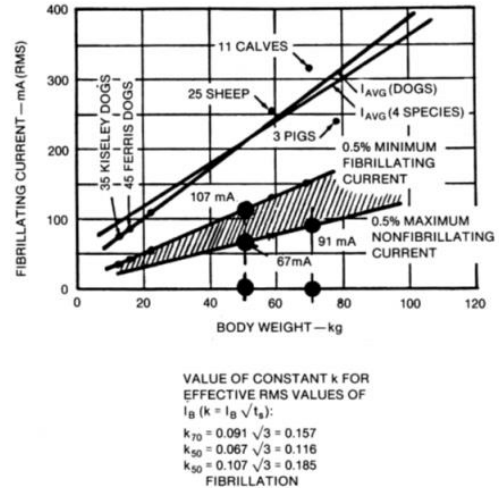


Figura 1. Corriente de fibrilación vs peso del cuerpo, en 3 segundos de duración de una falla. Extraído de [5]

Una vez calculada la corriente de paso, se calcula el voltaje de toque, que puede ser definido como el máximo voltaje que puede tolerar una persona con un equipo conectado a tierra, en el instante que ocurre una falla.

La distancia máxima en la que se puede generar este voltaje es de un metro, desde el equipo a la persona de forma horizontal. Se calcula de la siguiente manera:

$$E_p = (1000 + 6C_s\rho_s)I_B \quad (11)$$

Donde:

$\rho_s \rightarrow$ Resistividad de la capa de material superficial

$\rho \rightarrow$ Resistividad de la primera capa del suelo

$C_s \rightarrow$ Factor de resistencia de aumento por contacto

1000 \rightarrow Profundidad de los electrodos

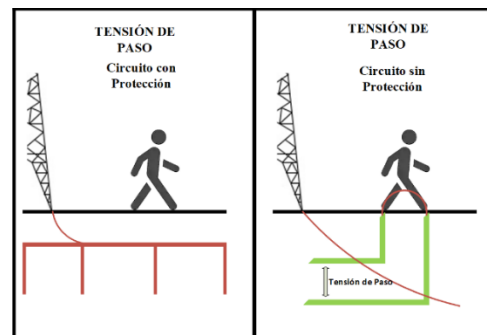


Figura 2. Circulación de la corriente de paso

La figura 2 muestra dos casos de como circula la corriente al tener protección y al no tenerla. En el primer caso se observa que la corriente viaja a través del cable que va desde nuestro sistema a proteger hasta el sistema de puesta a tierra, mientras que, en el segundo caso muestra a la corriente circular a través del personal una vez que da un paso con una distancia mínima de un metro.

La corriente máxima de paso que puede soportar el cuerpo humano va a depender de la masa corporal y del tiempo de falla (t_s). Para una persona de 50 kg se tiene la siguiente ecuación:

$$I_B = \frac{0.116}{t_s^2} \quad (12)$$

Mientras que para una persona de 70 kg se tiene la siguiente ecuación:

$$I_B = \frac{0.157}{t_s^2} \quad (13)$$

El voltaje de paso se lo puede definir como el máximo voltaje que puede soportar una persona caminando a través de la tierra. Se toma a una distancia de un metro entre dos puntos separados. El cálculo se detalla en la ecuación 14 tomando en cuenta que C_s se calcula por en la ecuación 6.

$$E_c = (1000 + 1.5C_s\rho_s)I_B \quad (14)$$

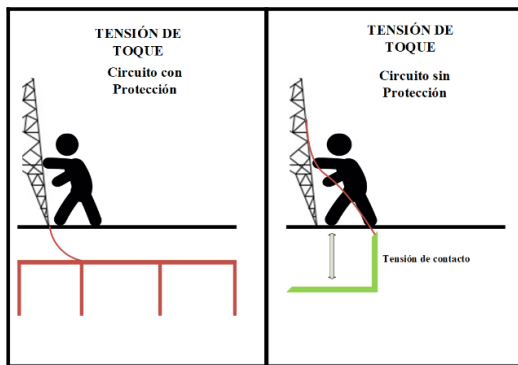


Figura 3. Circulación de la corriente de toque

La figura 3 muestra cómo actúa la corriente de toque al no tener un sistema de

puesta a tierra. Si una persona entra en contacto con un elemento de sistema no aterrizado y se presentan rayos o fallas en el sistema, la corriente pasa por el cuerpo hacia la tierra. De manera distinta sucede si el sistema está protegido ya que, al existir fallas en el sistema la corriente de falla va a pasar directo hacia la malla.

2.3.3 Longitud del conductor requerido

La longitud del conductor que se requiere para la implementación de la malla a tierra depende de algunas variables como el número de conductores principales, el número de conductores de unión, longitudes de la malla, tanto horizontal como vertical. La ecuación 15 muestra cómo se calcula la longitud del conductor [3][4].

$$L_c = C_m N_{cu} + L_m N_{cp} \quad (15)$$

$$N_{cp} = \left(\frac{C_m}{D_t} \right) + 1 \quad (16)$$

$$N_{cu} = \left(\frac{L_m}{D_t} \right) + 1 \quad (17)$$

Donde:

$L_c \rightarrow$ Longitud del conductor

$D_t \rightarrow$ Valor de espaciamientos entre los conductores paralelos

$C_m \rightarrow$ Distancia de la malla en el eje x

$L_m \rightarrow$ Distancia de la malla en el eje y

$N_{cp} \rightarrow$ Número de conductor principal

$N_{cu} \rightarrow$ Número de conductor de unión

El área total en la que se instala la puesta a tierra se calcula de la siguiente manera:

$$A = C_m L_m \quad (18)$$

El número mínimo de varillas, la longitud total de todas las varillas y la longitud total de los conductores son parámetros necesarios para poder calcular la resistencia de la malla de puesta a tierra mediante el método de Sverak. A continuación, se detalla cada una de las ecuaciones.

El cálculo del número mínimo de varillas viene dado por:

$$N_V = 0.60\sqrt{A} \quad (19)$$

Donde:

$N_V \rightarrow$ Número mínimo de varillas

Para calcular la longitud total de todas las varillas que se requieren para el montaje se lo puede calcular mediante:

$$L_R = N_V L_r \quad (20)$$

Donde:

$L_R \rightarrow$ Longitud total de las varillas

$L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla

El cálculo total de los conductores viene dado por la siguiente ecuación:

$$L_T = L_c + L_R \quad (21)$$

Si la malla posee un número significativo de electrodos la ecuación cambia y se la puede observar a continuación:

$$L_M = L_c + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (22)$$

Una vez realizado el cálculo de las variables que conforman la ecuación de Sverak, se procede a calcular la resistencia de la malla de puesta a tierra. A continuación, se muestra cómo se resuelve:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (23)$$

Donde:

$R_g \rightarrow$ Resistencia de la malla

$\rho \rightarrow$ Resistividad promedio de la malla en (Ωm)

$A \rightarrow$ Área total de la malla

$L_T \rightarrow$ Longitud total del conductor a utilizar

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en (Ωm)

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa inferior en (Ωm)

2.3.4 Elevación del potencial de tierra GPR

La elevación del potencial de tierra o ground potential rise, (por sus siglas en ingles), es el voltaje máximo permitido en la malla de la puesta a tierra. Es el resultado de la corriente máxima de falla por la resistencia total de la malla, se la determina de la siguiente manera:

$$GPR = I_G + R_g \quad (24)$$

Donde:

$I_G \rightarrow$ Corriente máxima de la malla ante una falla

$R_g \rightarrow$ Resistencia de la malla

2.4 Métodos para la medición de la Resistividad

Al tener solo estimaciones de la resistividad como se observa en la tabla 1 es necesario medir directo en el lugar donde se va a construir la puesta a tierra. Existen varios métodos para realizar esta medición. En el presente trabajo se detalla el método de Wenner y Schlumberger-Palmer [3][4][32].

2.4.1 Método de Wenner

El método de Wenner es el más usado, también se lo denomina el método de los cuatro puntos de Wenner.

El método se basa en colocar y enterrar en línea recta varillas pequeñas que toman la función de electrodos, en cuatro distintos

puntos del suelo a medir, a una profundidad ‘b’ y a una distancia ‘a’ como se lo puede apreciar en la figura 4.

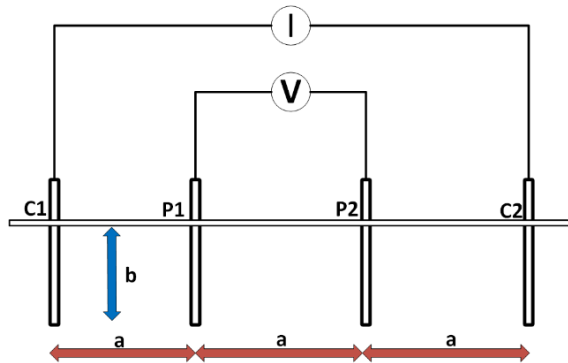


Figura 4. Método gráfico Wenner

El principio de funcionamiento consiste en inyectar corriente a través de los electrodos de los extremos y se mide voltaje en los electrodos del centro. De esta manera el telurómetro (equipo que mide la resistencia) aplica la ley de ohm $R = V/I$.

Una vez que se tiene la resistencia medida del suelo se aplica la ecuación 6 para determinar la resistividad aparente del suelo, como se detalla a continuación:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (25)$$

Donde:

$\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente del suelo (Ωm)

$R \rightarrow$ Resistencia medida Ω

$a \rightarrow$ Distancia entre electrodos

$b \rightarrow$ Profundidad de los electrodos

Si al momento de realizar se tiene la condición de b menor que a entonces se utiliza la siguiente ecuación:

$$\rho_a = 4\pi a R \quad (26)$$

2.4.2 Método de Schlumberger-Palmer

El método de Schlumberger-Palmer es muy similar al de Wenner. Se inyecta corriente en los electrodos que se sitúan en los extremos y se mide voltaje en los electrodos que se colocan al centro. La diferencia radica en que se separa de manera progresiva los electrodos que inyectan corriente es decir los extremos mientras que los electrodos centrales se mantienen. Esto se lo puede apreciar en la figura 5.

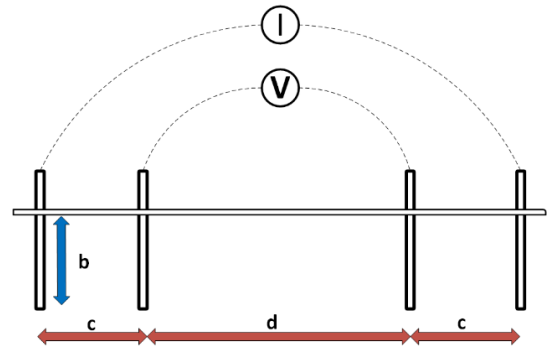


Figura 5. Método gráfico Schlumberger

Este método se utiliza de forma alternativa al de Wenner. Para calcular la resistividad aparente del terreno mediante este método se tiene la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (27)$$

Donde:

$c \rightarrow$ Distancia de separación entre el electrodo de corriente y voltaje

$d \rightarrow$ Distancia entre los electrodos de voltaje

2.5 Tipos de Suelo

Existen diferentes tipos de suelos. Es muy difícil encontrar un suelo homogéneo, es decir que todo el terreno tenga la misma composición. Por lo general el suelo está compuesto de dos o más capas, lo que significa que es heterogéneo. A continuación, se detalla cómo obtener la resistividad en los suelos uniformes, de dos capas y multicapas.

2.5.1 Suelo uniforme

Si la resistividad del suelo varía en una pequeña escala (menor al 30% según IEEE Std 80-2013), se puede utilizar este modelo y se puede calcular el valor promedio de las mediciones en diferentes sitios:

$$\rho_{ap} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} \dots \rho_{an}}{n} \quad (28)$$

Donde:

$\rho_{a1} \rightarrow$ Resistividades aparentes

$\rho_{a2} \rightarrow$ medidas desde puntos

$\rho_{an} \rightarrow$ diferentes

$n \rightarrow$ Número total de mediciones

2.5.2 Suelo de dos capas

El modelo de dos capas se utiliza cuando, en el lugar que se va a efectuar el montaje de la malla a tierra el terreno posee dos tipos de suelos. A esto se lo denomina capas. La profundidad de la capa o suelo superior se la puede medir. En cambio, la capa o suelo inferior no se puede determinar su profundidad y por tanto se le considera infinito. Ambas capas poseen resistividades distintas y a esta diferencia se la denomina factor de deflexión K, y se la puede calcular como:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (29)$$

Donde:

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior (Ωm)

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa inferior (Ωm)

El modelo de dos capas tiene una particularidad, ya que se puede utilizar el método de Sunde para llegar a determinar la resistividad aproximada del terreno.

El método de Sunde consiste en adquirir por medio de la gráfica de Sunde el valor de ρ_1 y ρ_2 mientras que h se obtiene de la relación entre ρ_1 y ρ_2 y la distancia que existe entre los electrodos. La figura 6 muestra las curvas del método de Sunde.

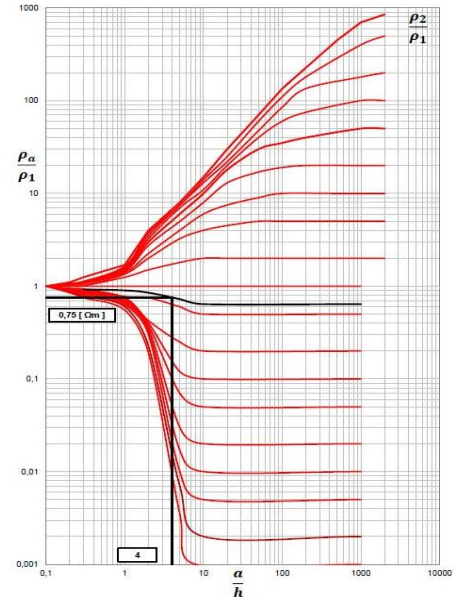


Figura 6. Curvas de Sunde. Extraído de [5]

2.5.3 Suelo multicapas

El modelo de suelos multicapas es utilizado cuando existen suelos sumamente heterogéneos es decir posee varias capas con resistividades muy distintas. El modelamiento de este tipo de suelos es más detallado y con mayor complejidad. Uno de los métodos más conocidos es el de los elementos finitos. Sin embargo, para el estándar de IEEE Std 80-2013 se utilizan las ecuaciones del suelo de dos capas.

2.6 Ecuaciones de Schwarz para suelos homogéneos y de dos capas.

Las ecuaciones de Schwarz permiten calcular la resistencia de la malla de forma distinta a la antes mencionada utilizando dimensiones de largo y ancho de la malla. Para suelos homogéneos se tiene la siguiente ecuación:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (30)$$

Donde:

$R_1 \rightarrow$ Resistencia de los conductores

$R_2 \rightarrow$ Resistencia de las varillas

$R_m \rightarrow$ Resistencia mutua entre las varillas y conductores

La resistencia de tierra de la malla se calcula a continuación:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{\sqrt{d_C h}} \right) - \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (31)$$

$$K_1 = -0.05 \frac{L_X}{L_Y} + 1.2 \quad (32)$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_X}{L_Y} + 4.68 \quad (33)$$

Donde:

- $L_C \rightarrow$ Longitud total de todos los conductores
- $d_C \rightarrow$ Valor de espaciamientos entre los conductores paralelos
- $h \rightarrow$ Profundidad de los conductores
- $A \rightarrow$ Área cubierta por los conductores
- $L_X \rightarrow$ Distancia de la malla en el eje x
- $L_Y \rightarrow$ Distancia de la malla en el eje y
- $\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno

La resistencia de las varillas y de la tierra mutua viene dado por la ecuación 34 y 35 respectivamente y se detalla a continuación:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (34)$$

Donde:

- $L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla
- $n_r \rightarrow$ Número de varillas
- $d_C \rightarrow$ Diámetro de las varillas

La resistencia mutua que existe entre la malla y las varillas viene dada por:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) - \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (35)$$

Las ecuaciones para suelos de dos capas se modifican tomando en cuenta que tienen suelos con diferentes resistividades y se detallan a continuación:

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{\sqrt{d_C h}} \right) - \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (36)$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d_2} \right) - 1 + \frac{2K_2 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (37)$$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) - \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (38)$$

$$\rho_a = \frac{L_r \rho_1 \rho_2}{\rho_2 (H - h) + \rho_1 (L_r + h - H)} \quad (39)$$

Donde:

- $h \rightarrow$ Profundidad de la malla
- $\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente
- $H \rightarrow$ Espesor de la capa superior (por medio de Sunde)
- $L_r \rightarrow$ Longitud de las varillas
- $\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en (Ωm)
- $\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa inferior en (Ωm)

2.7 Métodos para bajar la resistividad del suelo.

Reducir la resistividad del suelo en la que se va a implementar la malla de puesta a tierra en general suele ser sencillo. Se aumenta el calibre del conductor y de las varillas.

Existen otros métodos revisados por la literatura que ayudan a resolver este problema [33][34][35][36][37][38][39].

2.7.1 Bentonita

La bentonita es en un tipo de arcilla natural, proveniente de rocas volcánicas que contienen varios minerales que ayudan al

suelo a aumentar la resistividad. Las principales propiedades que posee la bentonita son que tiene una resistividad de $2.5 \Omega\text{m}$, con una capacidad para retener hasta el 300% de humedad, por ser un elemento higroscópico, es decir que capta y retiene el agua, en su forma líquida o de vapor. En la figura 7 se puede apreciar a la bentonita [40].

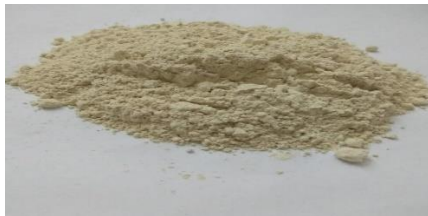


Figura 7. Bentonita

2.7.2 Sales y compuestos Minerales

Los compuestos de sales minerales como el cloruro de magnesio, sodio, o calcio y sulfatos de cobre, permiten aumentar la conductividad del suelo en el área donde se encuentra ubicado el electrodo o varilla. Su principal desventaja es que después de un tiempo estas sales se desplazan del lugar en el que originalmente fueron aplicadas. En la figura 8 se observa la distribución de este método.

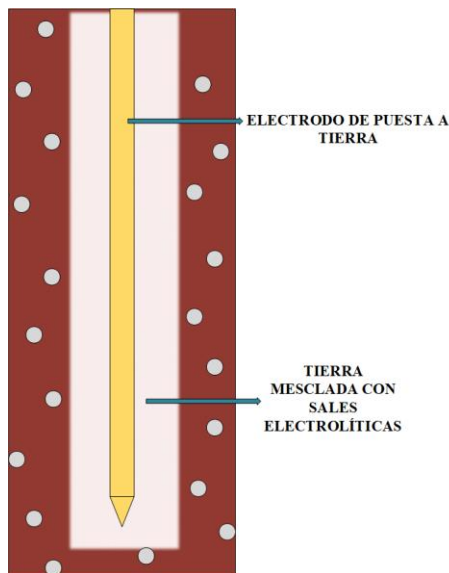


Figura 8. Ejemplo de un terreno aplicando sales minerales

2.7.3 Electrodo Especial

Existen electrodos huecos de cobre que permiten llenarlos con sales. Los electrodos poseen pequeños agujeros logrando que la humedad del suelo penetre el tubo y disuelva las sales que este posee. La solución que se forma sale a través de los agujeros del tubo hacia el terreno. La figura 9 muestra un ejemplo de este método.

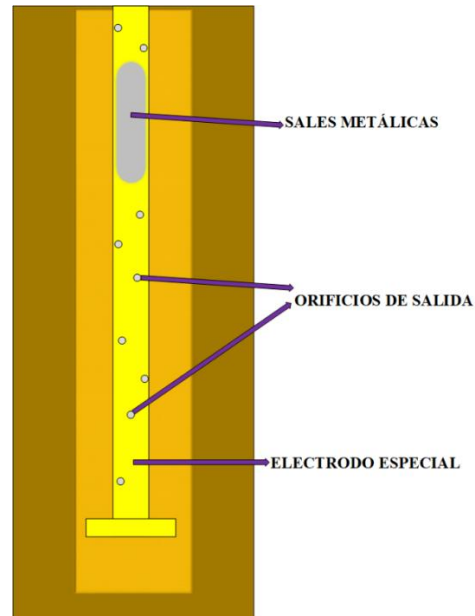


Figura 9. Electrodo hueco con orificios de salida

2.7.4 Revestimiento de concreto

Otro método para reducir la resistividad es, colocar un revestimiento de concreto alrededor del electrodo o varilla. La cualidad higroscópica del concreto permite captar la humedad del suelo, además de comportarse como un semiconductor alcanzando resistividades que van desde 30 a $90 \Omega\text{m}$.



Figura 10. Cemento especial conductivo

2.8 Modelo IEEE Std 80-2013

Se propone la programación de una aplicación para calcular y diseñar una puesta a tierra en el software Matlab tomando en consideración el estándar IEEE Std 80-2013.

A continuación, se detalla el funcionamiento del programa, además de apreciar el algoritmo que se utiliza en dicho programa.

La tabla 6 describe el algoritmo utilizado para para el dimensionamiento y el análisis de modelos de sistemas de puesta a tierra para diferentes electrodos y condiciones de suelos.

Tabla 5. Variables utilizadas en el algoritmo

a	Separación entre Picas en m.
R	Resistencia Medida en Ω .
ar	Radio de la Varilla en m.
L	Longitud de la Varilla en m
s	Espaciamento de la varilla en m
ρ_a	Resistividad aparente del suelo en Ω -m
Rm	Resistencia del sistema en Ω
n	Número de mediciones en campo
I_{cc}	Corriente asimétrica de falla, se utiliza la mayor registrada
$TCAP$	Capacidad térmica por unidad de volumen
Tc	Duración de la corriente en segundos
$Temp_{max}$	Temperatura de fusión en $^{\circ}C$
$Temp_{min}$	Temperatura mínima en $^{\circ}C$ (ambiente)
α_r	Coeficiente térmico de resistividad
ρ_r	Resistividad del conductor de tierra
K_o	Inverso del Coeficiente térmico de resistividad
A_{MCM}	Área del conductor en MCM
ρ_1	Capa Superior
ρ_2	Capa Inferior
H	Profundidad de la Capa Inferior
K	Coeficiente de Reflexión

C_s	Factor de disminución de la capa superficial
I_B	Corriente de paso
K'	Constante para valores efectivos de I_B que depende del peso de la persona
h_s	Espesor de la capa superior
ρ_s	Resistividad de la capa superior
Lr	Longitud total de Varillas en m
$Num_{varillas}$	Numero de varillas en unidades
$long_{varilla}$	Longitud de cada varilla en m
$Long_{malla}(L_T)$	Longitud total del conductor de la Malla m
A	Área de la Malla m^2
lx	Longitud de la malla en x dada en metros
lx_v	Numero de varillas en el eje x
ly	Longitud de la malla en y dada en metros
ly_v	Numero de varillas en el eje y
h	Profundidad de la malla enterrada en metros
R_g	Resistencia de la malla
Df	Factor de decremento por componentes DC
Sf	Es el factor de división de corriente
Cp	Incremento futuro de la corriente de falla
I_G	Corriente por la malla
GPR	aumento de potencia de la red
E_m	Voltaje de la Malla
K_m	Valor geométrico de espaciamento de la malla,
K_i	es el factor de irregularidad
L_M	longitud efectiva enterrada
E_s	Voltaje de paso por un punto por encima de la esquina exterior de la red y un punto fuera de la diagonal en la cuadrícula.
Ls	Longitud efectiva del conductor enterrado
d	Diámetro del conductor de la malla en m
D	Espacio entre los conductores paralelos en m
h_o	Referencia de la profundidad de la rejilla

En la tabla 5 se pueden apreciar las variables utilizadas en el algoritmo para la modelación del sistema de puesta a tierra.

Tabla 6. Algoritmo utilizado en la modelación del sistema de puesta a tierra

Algoritmo 1: Dimensionamiento y Modelado de Mallas a Tierra (DMMT)

Paso 1: Selección para puesta a Tierra según sea el caso.

Caso 1: Cálculo 1 varilla

Ingreso: a, R, ar, L

Salida: ρ_a, R_m

Caso 2: Cálculo 2 varillas

Ingreso: a, R, ar, L, s

Salida: ρ_a, R_m

Caso 3: Cálculo Mallas

Ingreso: $I_{cc}, Tc, Temp_max, Temp_min, A, R, TCAP, \rho_r, \alpha_r, K_o, \rho_s, h_s, peso_persona, L_x, L_y, L_{x_v}, L_{y_v}, h, S_f, D_f, I_f(3I_0), Num_varillas, long_varilla, d, D, h_0$

Salida: $\rho, A, E_{paso}, E_{toque}, Long_{conductor}, \text{Área}, R_g, I_g, GPR, L_R, k_{ii}, kh, km, ki, Em, ks, Es$.

Paso 2: Caso 1 - Cálculo 1 Varilla

$$\rho_a = 4\pi a R$$

$$R_m = \frac{\rho_a}{2 * \pi i * L} * \log\left(\frac{4 * L}{ar}\right) - 1$$

Paso 3: Caso 2 - Cálculo 2 Varillas

$$\rho_a = 4\pi a R$$

if $s > L$

$$R_m = \frac{\rho_a}{4 * \pi i * L} * \left(\log\left(\frac{4 * L}{ar}\right) - 1 \right) + \frac{\rho_a}{4 * \pi i * s} * \left(1 - \left(\frac{L^2}{3 * s^2} \right) + \left(\frac{2 * L^4}{5 * s^4} \right) \right)$$

else

if $s < L$

$$R_m = \frac{\rho_a}{4 * \pi i * L} * \left(\log\left(\frac{4 * L}{ar}\right) + \left(\log\frac{4 * L}{s} \right) - 2 \right) + \left(\frac{s}{2 * L} \right) - \left(\frac{s^2}{16 * L^2} \right) + \left(\frac{s^4}{512 * L^4} \right)$$

end if

end if

if $L = s$

Alerta: L debe ser diferente de s

end

Paso 4: Caso 3 – Cálculo para Mallas

Paso 4.1: Datos de Campo

if (es suelo uniforme)

$$\rho_{total} = \sum_{i=1}^n 2 * \pi i * a_i * R_i$$

$$\rho_{a(prom)} = \rho_a = \frac{\rho_{total}}{n}$$

else

if (Multicapas)

Creación de gráfica de Sunde

Selección de *Resistividad del Suelo (ohm-m)*

Selección de *Separación de Electrodo (m)*

ρ_1 = *resistividad de la capa superior*

ρ_2 = *resistividad de la capa inferior*

H = *espesor de la capa superior*

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$

$$\rho_a = \frac{L_r \rho_1 \rho_2}{\rho_2(H-h) + \rho_1(L_r + h - H)}$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln\left(\frac{2L_c}{L_r}\right) - \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

end if

end if

Paso 4.2: Computo del Dimensionamiento del Conductor.

$$A_{MCM} = I_{cc} \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{Tc \alpha_r \rho_r} \right) \log\left(\frac{K_0 + Temp_max}{K_0 + Temp_min} \right)}}$$

Paso 4.3: Criterio de Voltaje de Toque y Paso

$$C_s = 1 - \frac{0.99 \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09}$$

$$I_B = \frac{K'}{\sqrt{Tc}}$$

$$K'_{50} = 0.116$$

$$K'_{70} = 0.157$$

$$E_{paso} = (1000 + 6C_s \rho_s) I_B$$

$$E_{toque} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) I_B$$

Paso 4.4: Diseño Inicial

$$L_r = Num_{varillas} * long_{varilla}$$

$$Long_{malla} = (l_x * l_{x_v}) + (l_y * l_{y_v}) + L_r$$

$$\text{Área} = l_x * l_y$$

Paso 4.5: Resistencia de la Malla

$$R_g = \rho_a \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20} * A} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

Paso 4.6: Corriente de la Malla I_G

$$I_G = I_{cc} * D_f * S_f * C_p$$

Paso 4.7: Computo del GPR

$$GPR = I_G * R_g$$

if $GPR < E_{toque}$

Diseño cumple

else

Continuar con **Paso 4.9**

end

Paso 4.9: Voltaje de Malla (Em)

$$E_m = \frac{\rho_a I_G K_m K_i}{L_M}$$

$$L_S = 0.75 * L_T + 0.85 * L_r$$

$$E_s = \frac{\rho_a I_G K_s K_i}{L_s}$$

```

if  $E_m > E_{toque}$  &&  $E_s > E_{paso}$ 
  Diseño cumple
else
  Modificar Diseño (regresar al Paso 4.5)
end if

```

3. Análisis de Resultados

El programa permite escoger entre el cálculo de una varilla, dos varillas y de malla. Posee una pantalla principal que permite escoger entre estas tres opciones. A continuación, se analiza los resultados en cada una de estas opciones.

Los valores que se ingresan en el programa para realizar los casos de estudio se basan en el ejemplo propuesto de la IEEE Std 80-2013.



Figura 11. Pantalla Principal del programa

3.1 Cálculo para mallas

El cálculo de mallas requiere de más variables además de seguir los pasos del estándar IEEE Std 80-2013.

Figura 12. Ingreso de datos iniciales

Primero se debe ingresar el valor de la corriente y el tiempo de cortocircuito, la

temperatura máxima y mínima. Como se observa en la figura 12.

	Distancia (m)	R (ohm)
13	40	0.42
14	45	0.37
15	50	0.32
16		

Figura 13. Ingreso de datos medidos y tipo de suelo

La figura 13 muestra el paso 1, el cual consiste en ingresar la distancia y resistencia del suelo en el que se va a implementar la puesta a tierra. Se puede escoger que tipo de suelo es en este ejemplo, el tipo de suelo es de dos capas, se presiona en el botón resistividad y se puede apreciar justamente la resistividad del terreno, por ejemplo, al introducir 15 mediciones.

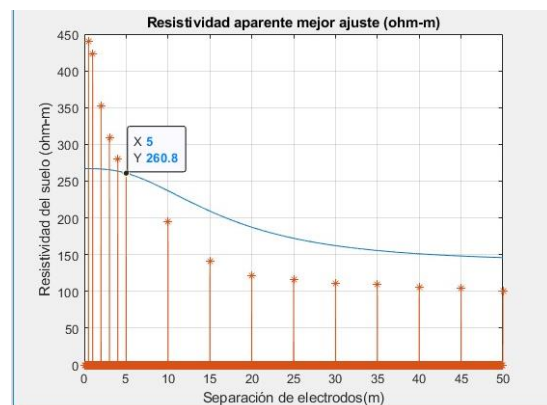


Figura 14. Método de Sunde

Al presionar este botón aparece la pantalla del método de Sunde como se observa en la figura 14, mismo que indica la separación de los electrodos y la resistividad de este método que se debe colocar en el programa.

Figura 15. Selección del conductor, parámetros de voltaje y diseño.

En la figura 15 se puede observar el ingreso de los parámetros de voltaje, diseño, así como también de la corriente y resistencia de la malla. Al ingresar todas estas variables se presiona Calcular. Al presionar Calcular, el programa muestra el mensaje que se puede apreciar en la figura 16.

Figura 16. Mensaje de cumplimiento del estándar IEEE 80

La condición que aplica el estándar IEEE Std 80-2013 se debe cumplir en la figura 16. Se observa la misma, al tener el voltaje de toque menor que el GPR. Una vez que se tiene este mensaje se presiona OK y da apertura a una nueva pantalla.

Al presionar OK se puede observar una nueva pantalla como se muestra en la figura 17. La cual consiste en ingresar el diámetro, la distancia entre varillas y la altura que estas poseen. Se presiona Calcular y se obtienen la solución de uno de los problemas propuestos en este documento.

Figura 17. Mensaje de cumplimiento del estándar IEEE 80

Se puede también calcular un sistema puesta tierra para un suelo uniforme seleccionando en la pestaña esta opción, y se incluirá los datos antes mencionados. Se puede encontrar la funcionalidad del programa mediante el manual de usuario realizado y que se encuentra incluido en el programa.

4. Conclusiones

Con el desarrollo del presente artículo se ha logrado concentrar múltiples técnicas de diseño para la construcción de sistemas de puestas a tierra observando el estándar IEEE 80-2013. Esto permitirá diseñar sistemas a tierra robustos, cuidando la integridad física de personas y equipos tecnológicos. Como resultado final se ha logrado obtener un algoritmo desarrollado en Matlab; que permita, modelar sistemas de puesta a tierra.

La ventaja fundamental del algoritmo desarrollado es que dispone de múltiples variables de decisión que nos permite verificar la convergencia del problema verificando magnitudes críticas de voltajes de toque y paso. En caso de no converger en una solución de diseño el modelo es capaz de solicitar al usuario que modifique las condiciones iniciales de diseño; permitiendo así, garantizar un sistema de puesta a tierra

seguro para usuarios y económicamente viables.

El modelo ha sido validado en función de casos base propuestos en el estándar mencionado en párrafos anteriores. Además, es capaz de dar solución a múltiples opciones de diseño, tales como; i) sistemas de 1 y 2 varillas y ii) solución de mallas para diferentes condiciones de superficies homogéneas y no homogéneas. Finalmente, el modelo es flexible para varios escenarios que pueden presentarse en campo proporcionando soluciones bajo estándares internacionales.

5. Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se pretende evaluar al modelo propuesto en el presente artículo con softwares comerciales, tales como; ETAP, Power Factory y ATP con la finalidad de estudiar los márgenes de error y las múltiples topologías de malla que pueden presentarse en los diferentes diseños de puesta a tierra para un mismo escenario.

6. Referencias

- [1] T. R. Ayodele, A. S. O. Ogunjuyigbe, And O. E. Oyewole, “Comparative Assessment Of The Effect Of Earthing Grid Configurations On The Earthing System Using Ieee And Finite Element Methods,” *Eng. Sci. Technol. An Int. J.*, Vol. 21, No. 5, Pp. 970–983, 2018.
- [2] W. Benxiang, X. Zhang, And X. Guoshun, “Research On Grounding Mode Of Ship Medium Voltage Ac/Dc Hybrid Power System,” 2017 *Int. Conf. Comput. Syst. Electron. Control. Iccsec* 2017, Pp. 1578–1581, 2018.
- [3] R. Jurado And J. Jiménez, “Diseño De Sistemas De Puesta A Tierra Partiendo De Un Modelo Biestratificado De Terreno, Aplicando Un Software Computacional En El Sector Industrial,” 2013.
- [4] A. Raizer, W. Valente, And V. L. Coelho, “Development Of A New Methodology For Measurements Of Earth Resistance, Touch And Step Voltages Within Urban Substations,” *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 153, Pp. 111–118, 2017.
- [5] J. S. R. Castaño, *Sistemas De Puesta A Tierra: Diseñado Con Ieee-80 Y Evaluado Con Mef.* 2010.
- [6] J. Trifunovic And M. Kostic, “An Algorithm For Estimating The Grounding Resistance Of Complex Grounding Systems Including Contact Resistance,” *Ieee Trans. Ind. Appl.*, Vol. 51, No. 6, Pp. 5167–5174, 2015.
- [7] H. Hu, R. Luo, M. Fang, S. Zeng, And F. Hu, “A New Optimization Design For Grounding Grid,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 108, No. October 2018, Pp. 61–71, 2019.
- [8] F. Ybanez, G. R. Molina, M. Piumetto, And G. Carvajal, “Some Considerations In The Behavior Of Grounding Systems With Impulsive Solicitations,” *Ieee Lat. Am. Trans.*, Vol. 11, No. 1, Pp. 560–565, 2013.
- [9] R. Shariatinasab, J. Gholinezhad, K. Sheshyekani, And M. R. Alemi, “The Effect Of Wide Band Modeling Of Tower-Footing Grounding System On The Lightning Performance Of Transmission Lines: A Probabilistic Evaluation,” *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 141, Pp. 1–10,

- 2016.
- [10] N. Rugthaicharoencheep And A. Phayomhom, "Grounding System Design Improvement By Compression Ratio And Ground Rod Methods In Power Distribution Substation," 2014 Int. Conf. Light. Prot. Iclp 2014, Pp. 869–872, 2014.
 - [11] L. Zhizhong, W. Sen, X. Jun, N. Bo, J. Hongliang, And X. Hua, "Performance Testing And Comprehensive Evaluation On Large Grounding Connection," 2011 7th Asia-Pacific Int. Conf. Light. Apl2011, Pp. 983–989, 2011.
 - [12] Y. Khan, F. R. Pazheri, N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, And M. I. Qureshi, "Novel Approach Of Estimating Grounding Pit Optimum Dimensions In High Resistivity Soils," Electr. Power Syst. Res., Vol. 92, Pp. 145–154, 2012.
 - [13] L. M. Popović, "Reduction Of The Fault Current Passing Through The Grounding System Of An Hv Substation Supplied By Cable Line," Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 99, No. February, Pp. 493–499, 2018.
 - [14] J. Guarnizo, "Implementación Del Sistema De Puesta A Tierra De Los Equipos En La Base De La Torre 2 De La Radio Universitaria 98.5 Mhz," 2015.
 - [15] J. Wu, J. He, B. Zhang, And R. Zeng, "Influence Of Grounding Impedance Model On Lightning Protection Analysis Of Transmission System," Electr. Power Syst. Res., Vol. 139, Pp. 133–138, 2016.
 - [16] I. P. E. Society, Ieee Guide For The Application Of Neutral Grounding In Electrical Utility Systems, Vol. 2000. 2000.
 - [17] X. Fan, P. Guo, F. Ma, R. Wang, And G. Yang, "Real-Time Simulation Of Grounding Fault Protection Method Used For Medium-Voltage Dc Power System Based On Rt-Lab," Chinese Control Conf. Ccc, Vol. 2018-July, Pp. 5842–5847, 2018.
 - [18] N. Mohamad Nor, S. Abdullah, R. Rajab, And Z. Othman, "Comparison Between Utility Sub-Station And Imitative Earthing Systems When Subjected Under Lightning Response," Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 43, No. 1, Pp. 156–161, 2012.
 - [19] A. B. Lima, C. E. F. Caetano, J. O. S. Paulino, W. C. Boaventura, I. J. S. Lopes, And C. F. Barbosa, "An Original Setup To Measure Grounding Resistances Using Fast Impulse Currents And Very Short Leads," Electr. Power Syst. Res., Vol. 173, No. October 2018, Pp. 6–12, 2019.
 - [20] N. Mohamad Nor, R. Rajab, And Z. Othman, "Validation Of The Earth Resistance Formulae Using Computational And Experimental Methods For Gas Insulated Sub-Station (Gis)," Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 43, No. 1, Pp. 290–294, 2012.
 - [21] E. L. Método Et Al., "Valores Permisibles De Resistencias De Puestas A Tierra De Protección En Redes Electricas," 2008.
 - [22] D. S. Gazzana, A. Smorgonskiy, N. Mora, A. Šunjerga, M. Rubinstein,

- And F. Rachidi, "An Experimental Field Study Of The Grounding System Response Of Tall Wind Turbines To Impulse Surges," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 160, Pp. 219–225, 2018.
- [23] L. M. Popović, *Grounding Systems Consisting Of Long External Electrodes*. 2018.
- [24] C. M. De Seixas And S. Kurokawa, "Using Circuit Elements To Represent The Distributed Parameters Of A Grounding System Under Lightning Strokes," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 172, No. February, Pp. 213–220, 2019.
- [25] G. Eduful, J. E. Cole, And P. Y. Okyere, "Optimum Mix Of Ground Electrodes And Conductive Backfills To Achieve A Low Ground Resistance," *Icast 2009 - 2nd Int. Conf. Adapt. Sci. Technol.*, Pp. 140–145, 2009.
- [26] P. E. Dev Paul And P. Ben Chavdarian, "A Closer Look At The Grounding Of Shore-To-Ship Power Supply System," *Conf. Rec. - Ind. Commer. Power Syst. Tech. Conf.*, Pp. 1–7, 2009.
- [27] I. P. E. Society, "Ieee Guide For The Application Of Neutral Grounding In Electrical Utility Systems," Group, Vol. 2000, 2000.
- [28] R. Shariatinasab And J. Gholinezhad, "The Effect Of Grounding System Modeling On Lightning-Related Studies Of Transmission Lines," *J. Appl. Res. Technol.*, Vol. 15, No. 6, Pp. 545–554, 2017.
- [29] M. I. Jambak, H. Ahmad, M. A. H. Mohammed, S. A. Jumaat, And M. A. B. Sidik, "Evaluation Of Grounding System For Ac Substation Using Sub-Ground (Sg) Software For Novice Professionals: Interpretation Based On Ieee Std. 80-1986," *Icecos 2017 - Proceeding 2017 Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. Sustain. Cult. Herit. Towar. Smart Environ. Better Futur.*, Pp. 321–327, 2017.
- [30] M. Hannig, "Calculation Of The Assembled Grounding Resistance From Complex Grounding Systems By Using Analytical Considerations Only," *Ichve 2018 - 2018 Ieee Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, No. 3, Pp. 1–4, 2019.
- [31] S. Protective, D. Committee, I. Power, And E. Society, *Grounding In Electrical Utility Systems*, Vol. 2009, No. June. 2009.
- [32] J. Trifunovic And M. Kostic, "Quick Calculation Of The Grounding Resistance Of A Typical 110 Kv Transmission Line Tower Grounding System," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 131, Pp. 178–186, 2016.
- [33] F. M. S. Sinchi, F. A. P. Quizhpi, H. P. C. Guillen, And S. N. N. Quinde, "Soil Treatment To Reduce Grounding Resistance By Applying Low-Resistivity Material (Lrm) And Chemical Ground Electrode In Different Grounding Systems Configurations," *2018 Ieee Int. Autumn Meet. Power, Electron. Comput. Ropec 2018*, No. Ropec, 2019.
- [34] W. L. Lai, W. F. H. Wan Ahmad, J. Jasni, And M. Z. A. Ab Kadir, "A

- Review On The Usage Of Zeolite, Perlite And Vermiculite As Natural Enhancement Materials For Grounding System Installations,” Ieee Student Conf. Res. Dev. Inspiring Technol. Humanit. Scored 2017 - Proc., Vol. 2018-Janua, Pp. 338–343, 2018.
- [35] Q. Meng, J. He, F. P. Dawalibi, And J. Ma, “A New Method To Decrease Ground Resistances Of Substation Grounding Systems In High Resistivity Regions,” Ieee Trans. Power Deliv., Vol. 14, No. 3, Pp. 911–916, 1999.
- [36] S. C. Lim, C. Gomes, And M. Z. A. Ab Kadir, “Electrical Earthing In Troubled Environment,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 47, No. 1, Pp. 117–128, 2013.
- [37] J. Trifunović, “The Algorithm For Determination Of Necessary Characteristics Of Backfill Materials Used For Grounding Resistances Of Grounding Loops Reduction,” J. Electr. Eng., Vol. 63, No. 6, Pp. 373–379, 2012.
- [38] J. Nahman And I. Paunovic, “Resistance To Earth Of Earthing Grids Buried In Multi-Layer Soil,” Electr. Eng., Vol. 88, No. 4, Pp. 281–287, 2006.
- [39] J. Nahman And I. Paunovic, “Effects Of The Local Soil Nonuniformity Upon Performances Of Ground Grids,” Ieee Trans. Power Deliv., Vol. 22, No. 4, Pp. 2180–2184, 2007.
- [40] W. R. Jones And N. York, “Bentonite Rods Assure Ground Rod Installation In Problem Soils,” Vol. 75, No. 4, Pp. 1343–1346, 1980.

6.1 Estado del Arte

Tabla 7. Matriz del Estado del arte

ANÁLISIS DE MODELOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA DIFERENTES ELECTRODOS Y CONDICIONES DE SUELOS.																								
DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	ANÁLISIS DE MODELOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA DIFERENTES ELECTRODOS Y CONDICIONES DE SUELOS.	REFERENCIA	Sistema de puesta a Tierra	Voltaje de Paso	Voltaje de Toque	Tratamiento del Suelo	Resistencia de la malla	Resistividad del suelo	Voltaje de Toque y Paso Tolerable	Tratamiento del Suelo	Tipos de Suelo	Voltaje de Paso Tolerable	Voltaje de Toque Tolerable	Tipo de Suelo	Tratamiento del Suelo	Método de Wenner	Método de Sunde	Método de Schlumberger-Palmer	Método de Schwarz	IEEE 80 2000	Método de Wenner	Método de Sunde	Resistencia del sistema de la malla
1	2018	Comparative Assessment Of The Effect Of Earthing Grid Configurations On The Earthing System Using Ieee And Finite Element Methods	T. R. Ayodele, A. S. O. Ogunjuyigbe, And O. E. Oyewole	✖	✖	✖	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	□	□	✖	□	□	□	✖	✖	□	✖
2	2018	Research On Grounding Mode Of Ship Medium Voltage Ac/De Hybrid Power System	W. Benxiang, X. Zhang, And X. Guoshun	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	✖	□	□	□	□	✖	□	□	✖
3	2013	Diseño De Sistemas De Puesta A Tierra Partiendo De Un Modelo Biestratificado De Terreno, Aplicando Un Software Computacional En El Sector Industrial	R. Jurado And J. Jiménez	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	✖
4	2017	Development Of A New Methodology For Measurements Of Earth Resistance, Touch And Step Voltages Within Urban Substations	A. Raizer, W. Valente, And V. L. Coelho	✖	✖	□	✖	✖	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	✖
5	2010	Sistemas De Puesta A Tierra: Diseñado Con Ieee-80 Y Evaluado Con Mef	R. Castaño	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	□	□	□	□	✖	✖	□	□	✖
6	2015	An Algorithm For Estimating The Grounding Resistance Of Complex Grounding Systems Including Contact Resistance	J. Trifunovic And M. Kostic	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	✖	✖	✖	✖
7	2019	A New Optimization Design For Grounding Grid	H. Hu, R. Luo, M. Fang, S. Zeng, And F. Hu	✖	✖	✖	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	□	□	✖	□	✖	□	✖	✖	□	✖
8	2013	Some Considerations In The Behavior Of Grounding Systems With Impulsive Solicitations	F. Ybanez, G. R. Molina, M. Piumetto, And G. Carvajal	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	✖

9	2016	The Effect Of Wide Band Modeling Of Tower-Footing Grounding System On The Lightning Performance Of Transmission Lines: A Probabilistic Evaluation	R. Shariatinasab, J. Gholinezhad, K. Sheshyekani, And M. R. Alemi	✖	✖	□	□	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	□	□	□	✖	✖	✖	✖	□	✖	✖
10	2014	Grounding System Design Improvement By Compression Ratio And Ground Rod Methods In Power Distribution Substation	N. Rugthaicharoencheep And A. Phayomhom	✖	✖	✖	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	□	□	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖
11	2011	Performance Testing And Comprehensive Evaluation On Large Grounding Connection	L. Zhizhong, W. Sen, X. Jun, N. Bo, J. Hongliang, And X. Hua	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	✖	
12	2012	Novel Approach Of Estimating Grounding Pit Optimum Dimensions In High Resistivity Soils	Y. Khan, F. R. Pazheri, N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, And M. I. Qureshi	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	✖	✖
13	2018	Reduction Of The Fault Current Passing Through The Grounding System Of An Hv Substation Supplied By Cable Line	L. M. Popović	✖	✖	✖	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	□	□	✖	□	□	✖	✖	✖	□	✖
14	2015	Implementación Del Sistema De Puesta A Tierra De Los Equipos En La Base De La Torre 2 De La Radio Universitaria 98.5 Mhz	J. Guarnizo	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	✖	□	□	□	□	✖	□	□	✖
15	2016	Influence Of Grounding Impedance Model On Lightning Protection Analysis Of Transmission System	J. Wu, J. He, B. Zhang, And R. Zeng	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖
16	2000	Ieee Guide For The Application Of Neutral Grounding In Electrical Utility Systems	I. P. E. Society	✖	✖	✖	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	□	□	✖	□	□	□	✖	✖	□	✖
17	2018	Real-Time Simulation Of Grounding Fault Protection Method Used For Medium-Voltage Dc Power System Based On Rt-Lab	X. Fan, P. Guo, F. Ma, R. Wang, And G. Yang	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	✖	□	□	□	□	✖	□	□	✖
18	2012	Comparison Between Utility Sub-Station And Imitative Earthing Systems When Subjected Under Lightning Response	N. Mohamad Nor, S. Abdullah, R. Rajab, And Z. Othman	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖
19	2019	An Original Setup To Measure Grounding Resistances Using Fast Impulse Currents And Very Short Leads	A. B. Lima, F. Caetano, J. Paulino, C. Boaventura	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
20	2012	Validation Of The Earth Resistance Formulae Using Computational And Experimental Methods For Gas Insulated Sub-Station (Gis)	N. Mohamad Nor, R. Rajab, And Z. Othman	□	□	□	□	□	□	✖	□	✖	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	□
21	2008	Valores Permisibles De Resistencias De Puestas A Tierra De Protección En Redes Eléctricas	E. L. Método Et Al	□	□	✖	□	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	✖	✖	□	□	□	✖	✖	□
22	2018	An Experimental Field Study Of The Grounding System Response Of Tall Wind Turbines To Impulse Surges	D. S. Gazzana, A. Smorgonskiy, N. Mora, A. Sunjerga,	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□
23	2018	Grounding Systems Consisting Of Long External Electrodes	L. M. Popović	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	✖	□	□	✖	✖	✖	□	✖
24	2019	Using Circuit Elements To Represent The Distributed Parameters Of A Grounding System Under Lightning Strokes	C. M. De Seixas And S. Kurokawa	✖	✖	□	✖	✖	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	✖	✖	□	□	✖
25	2009	Optimum Mix Of Ground Electrodes And Conductive Backfills To Achieve A Low Ground Resistance	G. Eduful, J. E. Cole, And P. Y. Okyere	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	✖
26	2009	A Closer Look At The Grounding Of Shore-To-Ship Power Supply System	P. E. Dev Paul And P. Ben	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	✖
27	2000	Ieee Guide For The Application Of Neutral Grounding In Electrical Utility Systems	I. P. E. Society	✖	✖	✖	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	□	□	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖
28	2017	The Effect Of Grounding System Modeling On Lightning-Related Studies Of Transmission Lines	R. Shariatinasab And J. Gholinezhad	✖	✖	□	□	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	✖
29	2017	Evaluation Of Grounding System For Ac Substation Using Sub-Ground (Sg) Software For Novice Professionals: Interpretation Based On Ieee Std. 80-1986	M. I. Jambak, H. Ahmad, H. Mohammed, S. A. Jumaat, And B. Sidik	✖	✖	✖	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	□	□	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖
30	2019	Calculation Of The Assembled Grounding Resistance From Complex Grounding Systems By Using Analytical Considerations Only	M. Hannig	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	✖

31	2009	Grounding In Electrical Utility Systems	S. Protective, D. Committee	✖	✖	□	□	✖	✖	✖	□	□	✖	□	□	□	□	✖	□	✖	✖	□	✖	✖
32	2016	Quick Calculation Of The Grounding Resistance Of A Typical 110 Kv Transmission Line Tower Grounding System	J. Trifunovic And M. Kostic	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	□	✖	□	✖	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	✖
33	2019	Soil Treatment To Reduce Grounding Resistance By Applying Low-Resistivity Material (Lrm) And Chemical Ground Electrode In Different Grounding Systems Configurations	S. Sinchi, P. Quizhpi, C. Guillen, And S. Quinde	✖	✖	✖	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	□	□	✖	□	□	✖	✖	✖	□	✖
34	2018	A Review On The Usage Of Zeolite, Perlite And Vermiculite As Natural Enhancement Materials For Grounding System Installations	L. Lai, H. Wan Ahmad, J. Jasni, And M.Ab Kadir	✖	✖	□	□	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	✖
35	1999	A New Method To Decrease Ground Resistances Of Substation Grounding Systems In High Resistivity Regions	Q. Meng, J. He, F. P. Dawalibi, And J. Ma	✖	□	✖	□	✖	□	□	✖	□	□	✖	□	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	✖
36	2013	Electrical Earthing In Troubled Environment	S. C. Lim, C. Gomes, And M. Z. A. Ab Kadir	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	✖
37	2012	The Algorithm For Determination Of Necessary Characteristics Of Backfill Materials Used For Grounding Resistances Of Grounding Loops Reduction	J. Trifunović	✖	✖	✖	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	✖
38	2006	Resistance To Earth Of Earthing Grids Buried In Multi-Layer Soil	J. Nahman And I. Paunovic	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
39	2007	Effects Of The Local Soil Nonuniformity Upon Performances Of Ground Grids	J. Nahman And I. Paunovic	✖	✖	□	□	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	✖	□	□	□	□	✖	□	□	✖
40	1980	Bentonite Rods Assure Ground Rod Installation In Problem Soils	R. Jones And N. York	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	✖	✖	□	□	□	✖	□
CANTIDAD:				33	31	18	17	33	31	14	17	14	31	18	17	17	16	11	12	21	33	16	11	33

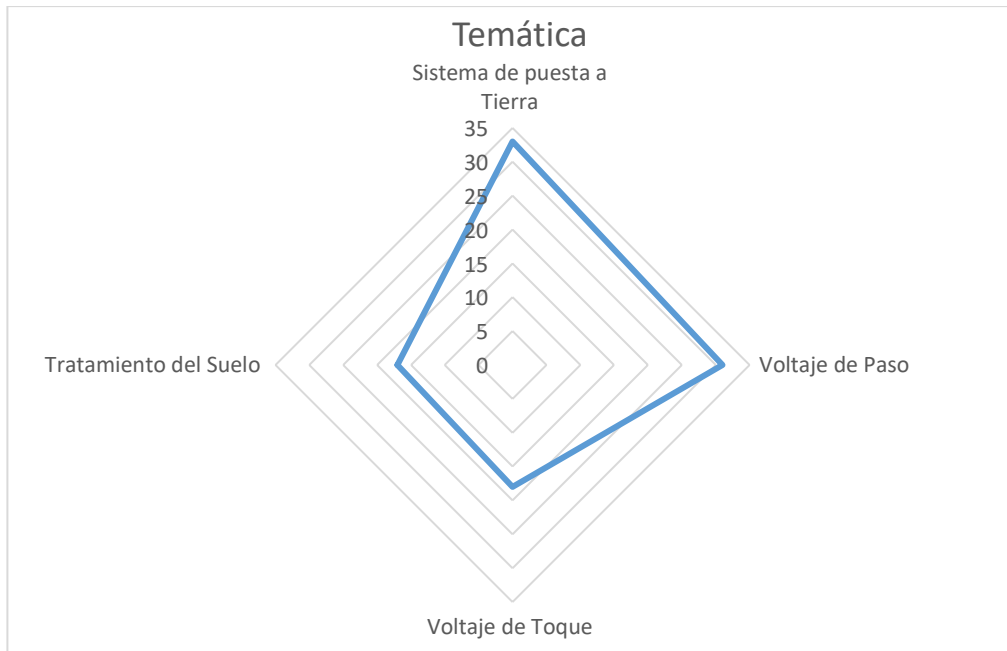


Figura 18. Temática

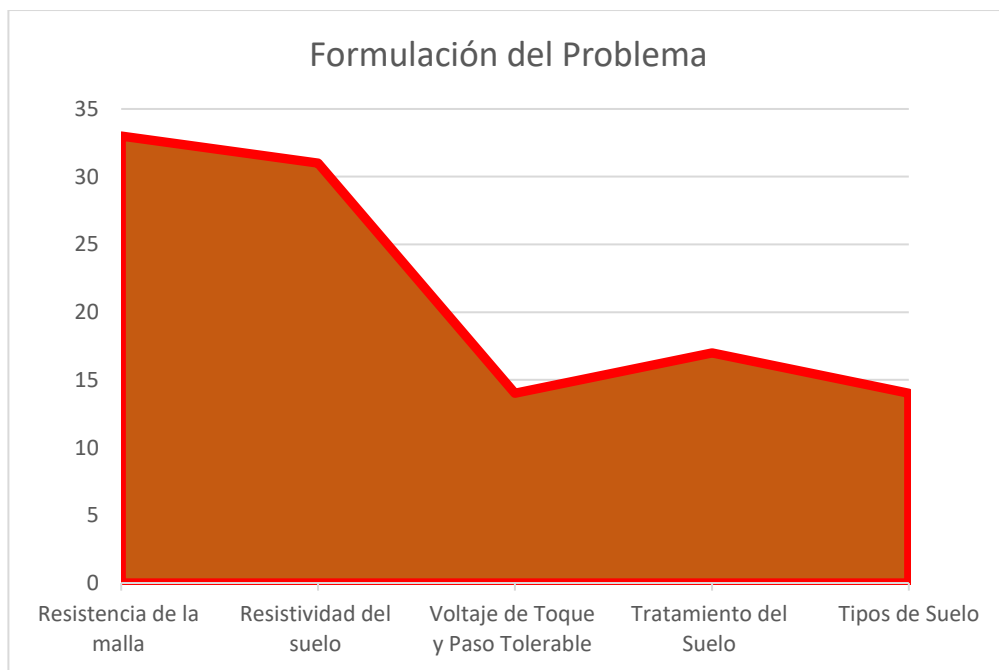


Figura 19. Formulación del problema

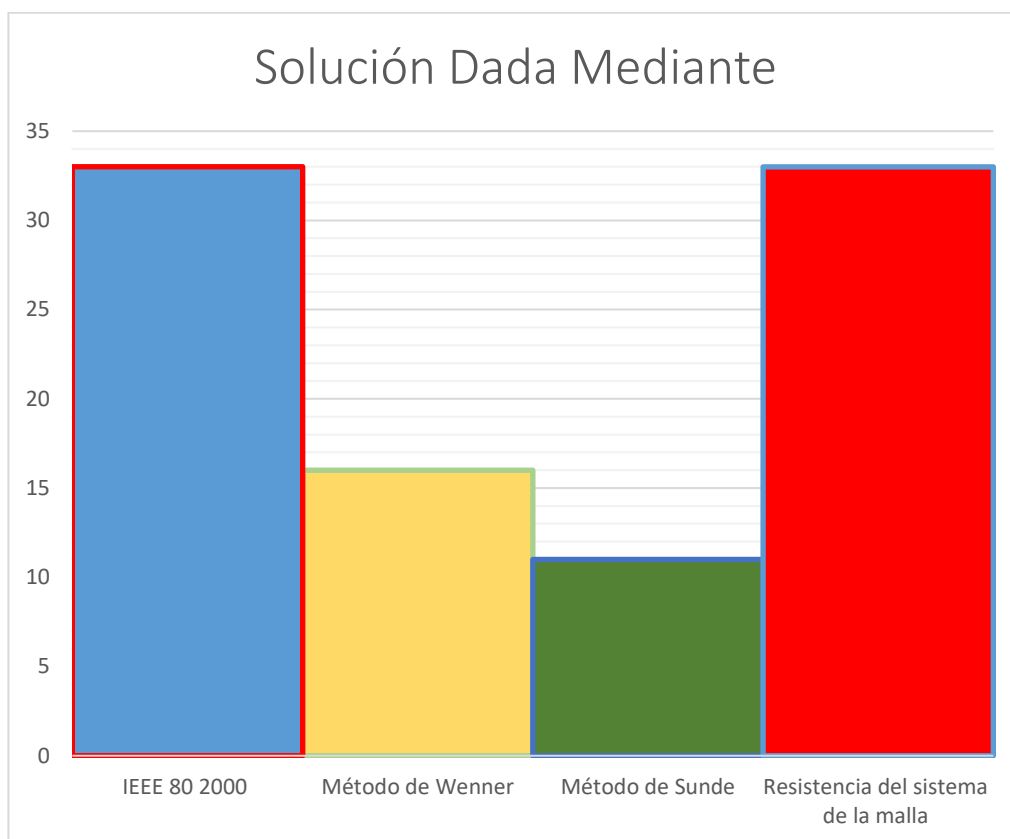


Figura 20. Solución